

Anhebung der Zähigkeitseigenschaften alterungsversprödeter Baustähle durch gezielte Ertüchtigungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Schweißbeignung

C. Gajda, J. Schuster, S. Wagner, S. Keitel

SLV Halle GmbH

gajda@slv-halle.de

Abstract

Schäden durch natürliche Alterungsvorgänge stellen im Stahlbau eine schwer kalkulierbare Größe dar. Altstähle zeichnen sich durch eingeschränkte Schweißbeignung aus. Unter Beachtung der für solche Werkstoffe typischen Eigenschaften ist es für Anwender und Betreiber oft sehr schwierig, diese Stähle korrekt einzuschätzen und schweißtechnisch zu verarbeiten. Nicht zuletzt aufgrund der eingeschränkten schweißmetallurgischen Eigenschaften ist es gemäß verschiedener Regelwerke zum Teil untersagt, derartige Werkstoffe schweißtechnisch zu verarbeiten. Nicht allein aus kultur- oder industriehistorischer Sicht sind Altstähle präsent, auch im Bereich der Nutzbauten stellen sie gegenwärtig einen Großteil des Bestandes dar. Für ihren Erhalt und Instandhaltung ist ein Großteil der öffentlichen Aufwendungen des Bundes bereitgestellt. Soll an Konstruktionen aus Altstahl geschweißt werden, ist das oft mit zusätzlichen Werkstoffuntersuchungen verbunden. Diese sind notwendig, um die Eigenschaften, insbesondere die der Schweißbeignung, zu evaluieren. Eine solche ist oftmals nicht gegeben, was erheblichen Einfluss auf die Bewertung der Restnutzungsdauer hat. Während bislang davon ausgegangen wurde, dass die Schwingfestigkeit gealterter und versprödeter Bauteile aus Altstählen herabgesetzt ist, konnte durch aktuelle Forschungsprojekte nachgewiesen werden, dass durch zyklisch schwingende Beanspruchung kein vorzeitiges Bauteilversagen infolge Alterung zu erwarten ist. Entscheidend für die Ermüdungsfestigkeit ist die geometrische Kerbe, welche in größerer Konkurrenz zur metallurgischen Kerbe durch Versprödung steht. Unumstritten bleibt jedoch die Tatsache, dass durch die erwähnte Werkstoffversprödung erhebliche Defizite in der Zähigkeit vorhanden sind. Demzufolge bleibt die Spröbruchneigung des Werkstoffes die eigentliche Gefahr von Altstahlkonstruktionen hinsichtlich der Restnutzungsdauerbewertung. Würde es gelingen, die Spröbruchempfindlichkeit zu verringern und die Festigkeitseigenschaften von Altstahl weiterhin zu gewährleisten, könnte die erreichte Nutzungsdauer des Bauwerkes

verlängert und ein teurer Abriss verhindert oder zumindest sinnvoll aufgeschoben werden.

Einführung

Schäden durch natürliche Alterungsvorgänge stellen im Stahlbau eine schwer kalkulierbare Größe dar. Eine exponierte Stellung nehmen dabei die gegenwärtig noch häufig zu findenden sogenannten Altstähle ein. Darunter werden Stahlwerkstoffe verstanden, deren Herstellung vor Einführung des Sauerstoffaufblasverfahrens, d. h. vor 1960, stattfand. Sie gelten als alterungsempfindlich und zeichnen sich durch eingeschränkte Eignungen hinsichtlich schweißtechnischer Verarbeitungen aus.

Unter Beachtung der für Altstähle typischen Eigenschaften ist es für Anwender und Betreiber daraus errichteter Konstruktionen oft sehr schwierig, diese Werkstoffe korrekt einzuschätzen und sie zu verarbeiten. Nicht zuletzt aufgrund der eingeschränkten schweißmetallurgischen Eigenschaften ist es gemäß einigen Regelwerken der praktischen Anwendung, z. B. dem Richtlinienwerk der Deutschen Bahn AG [1], untersagt, derartige Werkstoffe schweißtechnisch zu verarbeiten. Dieses teilweise Schweißverbot findet auch im allgemeinen Stahlbau Anwendung, da es gegenwärtig kein gültiges Regelwerk für Altstähle gibt, jedoch zahlreiche Anwendungen dieser Werkstoffe an Stahlkonstruktionen im Brücken-, Anlagen- und Hochbau. Hierzu ist anzumerken, dass Bauteile, Halbzeuge und Profile, deren Herstellung vor 1960 liegt, nicht vom aktuellen Regelwerk für Stahlerzeugnisse DIN EN 10 025-2 erfasst werden [2, 3]. Ihre Eigenschaften können nach aktuellem Standard nicht gewährleistet werden. Hinzu kommt oftmals noch, dass die Hersteller der entsprechenden Erzeugnisse heute nicht mehr existent sind und daher keinen Regressansprüchen mehr gerecht werden könnten. Aus diesen Gründen ist es aktuell häufig üblich, Altstahlkonstruktionen in der Regel rückzubauen. Dies ist insbesondere dann fragwürdig, wenn neben den dabei anfallenden Kosten und Herstellung der Neuteile auch kulturhistorisch-relevante Aspekte berücksichtigt werden sollten. So prägen ästhetisch ausgeführte Altstahlkonstruktionen oft das Bild in den Städten und Industriezentren. Mit fortschreitendem Alter kommen für die Denkmalsbewertung der Gegenwart immer mehr Stahlbauwerke, darunter auch solche, die sich nicht offensichtlich als derartige zu erkennen geben (z. B. Stahlbetonbauten in Skelettbauweise), in Betracht, als erhaltenswürdig eingestuft zu werden. Ihre Instandhaltung erfor-

dert Fachwissen und Sorgfalt, soll der historische Charakter unverfälscht erhalten bleiben. Bereits im Jahr 1964 wurde dem durch die Verabschiedung der Charta von Venedig Rechnung getragen [4]. Doch nicht allein aus kultur- oder industriehistorischer Sicht sind Altstähle präsent, auch im Bereich der Nutzbauten stellen sie gegenwärtig einen Großteil des Bestandes dar. So sind ca. 50 % der Brücken im Schienennetz der Deutschen Bahn derzeit älter als 80 Jahre, davon wiederum 80 % älter als 100 Jahre [5]. Auch im Straßennetz sind ca. 6.000 Brückenbauwerke im Alter ab 80 Jahren zu finden. Für ihren Erhalt und Instandhaltung sind ein Großteil der öffentlichen Aufwendungen des Bundes bereitgestellt [6, 7].

Soll an Altstahlkonstruktionen dennoch gearbeitet werden, ist dies oft mit zusätzlichen werkstofflichen Untersuchungen verbunden. Diese sind notwendig, um die eingangs beschriebenen Eigenschaften, insbesondere die der Schweißbeignung, zu evaluieren. Eine Schweißbeignung ist oftmals aus den o. g. Gründen nicht gegeben, was erheblichen Einfluss auf die Bewertung der Restlebensdauer hat. Während bislang davon ausgegangen wurde, dass die Schwingfestigkeit gealterter und versprödeter Bauteile aus Altstählen negativ beeinflusst wurde, konnte vor kurzem nachgewiesen werden, dass auch durch zyklisch-schwingende Belastung kein vorzeitiges Bauteilversagen durch Alterung oder metallurgische Gründe zu erwarten ist. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass auch der scheinbar negative Einfluss der Alterungsvorgänge im Werkstoff keine Relevanz auf die statische und zyklisch schwingende Festigkeit hat. Der Werkstoff verhält sich in diesem Fall nicht anders als ein moderner Baustahl aus aktueller Produktion. Entscheidend für die Ermüdungsfestigkeit ist lediglich die geometrische Kerbe, welche in größerer Konkurrenz zur metallurgischen Kerbe durch Versprödung steht. Unumstritten bleibt jedoch die Tatsache, dass durch die erwähnte Werkstoffversprödung erhebliche Defizite in der Zähigkeit vorhanden sind. Dies wird gegenwärtig anhand von Kerbschlagbiegeversuchen im Zuge von Altstahluntersuchungen vielfach bestätigt [8].

Demzufolge bleibt die Einschränkung der Zähigkeitseigenschaften, d .h. die Spröbruchneigung des Werkstoffes, die eigentliche Gefahr hinsichtlich der Restnutzungsdauerbewertung. In dieser Tatsache steckt demnach das höchste Potenzial. Würde es durch Forschung gelingen, die Spröbruchempfindlichkeit zu verringern und stabilitätsichernde Eigenschaften von Altstahl weiterhin zu gewährleisten, könnte die erreichte Lebensdauer des Bauwerkes (z. B. 80 Jahre nach Erbauung) durch eine Restlebensdauer

(z. B. weitere 80 Jahre nach Bewertung/Ertüchtigung) erweitert und ein teurer Abriss verhindert oder zumindest aufgeschoben werden.

Ausgewählte historische Werkstoffe im Überblick

Bei Betrachtung typischer Vertreter historischer Stahlwerkstoffe ist häufig Bezug auf das Herstellungsverfahren zu nehmen. So lassen sich die meisten Stähle anhand der Art ihrer Erschmelzung historisch einordnen und entsprechend charakterisieren. Gleichzeitig gehen mit der Herstellungsart auch metallurgische Eigenschaften dieser Stähle einher. So weisen windgefrischte Flusstähle einen teilweise sehr hohen Stickstoff-Gehalt auf, da im Herstellungsprozess Luftstickstoff in die Schmelze gelangen konnte und atomar gelöst wurde. Infolge Diffusion gilt es als hauptsächlich verursachendes Alterungselement im Stahl.

Zu beachten bleibt, dass die historischen Begriffe um die Stahlerzeugung nicht vollständig deckungsgleich mit der modernen Terminologie sind. Während heutzutage unter Stahl eine schmiedbare Eisenbasislegierung mit max. 2,06 % Kohlenstoff verstanden wird, galt Stahl im 19. Jahrhundert lediglich als Sonderform des „schmiedbaren Eisens“ mit einem eng begrenzten Fenster an C-Gehalt. Werkstoffe mit bis zu max. 0,2 % C, welche nach heutigem Verständnis zu den Stählen zählen, wurden bis ca. 1920 als „Eisen“ bezeichnet, mit Bezug auf ihr gutes Umformverhalten beim Schmieden. Werkstoffe mit über 2,06 % C wurden als „Roheisen“ bezeichnet, welches unserem heutigen Gusseisen mit Lamellengraphit entspricht. Es konnte dem Hochofen ohne aufwendige Raffination entnommen werden und zu endkonturnahen Geometrien im damals aufkeimenden Maschinenbau vergossen werden. Erst um das Jahr 1916 erfuhr das Gusseisen eine weitere Evolutionsstufe, als es in Zusammenhang mit Verschleißproblemen für die Verwendung im Motorenbau qualifiziert werden sollte [9]. Insbesondere in Bezug auf Instandsetzungs- und Sanierungsmaßnahmen ist die dargestellte Terminologie zu beachten, da die historischen Begriffe inhaltlich teilweise erheblich vom aktuellen Kontext abweichen. Den verwendeten Werkstoff am Baujahr eines Bauwerkes festmachen zu wollen, ist oftmals nicht ohne weiteres möglich, da die Herstellungsverfahren auch zeitlich parallel zur Anwendung kamen. Erst bei Bekanntheit eines Herstellers und dessen Geschichte ist es möglich, anhand der zeitlichen Zuordnung abzuschätzen, wann welches Erzeugungsverfahren zur Verwendung kam und darüber auf den Werkstoff zu schließen. Endgültige Gewissheit liefern jedoch erst geeignete Altstahluntersuchungen, welche ohnehin bei Untersuchung der Schweißbeignung des Materials notwendig werden.

Zu einer sinnvollen Altstahluntersuchung gehören mindestens die chemische Analyse (mittels Funkenspektrometrie F-OES) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung, der metallographische Makroschliff zur Bewertung des Verunreinigungsgrades sowie der Kerbschlagbiegeversuch zur Evaluierung des Versprödungsgrades. Zusätzlich kann der Zugversuch zur Bestimmung der mechanisch-technologischen Eigenschaften sowie der Zuordnung zu einer möglichen Stahlsorte nach bekanntem Regelwerk erfolgen. Sollte es an Bauwerken möglich sein und es sich aus Sicht des Statikers als unproblematisch darstellen, sollten großzügige Blechabschnitte für diese Untersuchungen herangezogen werden. Als Mindestumfang hat sich die Entnahme von Bohrkernen etabliert.

Im Zuge der historisch gewachsenen stetigen Zunahme der Rohstahlproduktion und der hohen Akzeptanz des Werkstoffes Stahl im Hochbau stellen Altstähle aktuell einen Großteil der baulichen Substanz dar. Dabei spielt das Herstellungsjahr des betreffenden Bauwerkes eine bedeutende Rolle. Während bis in die 1940er Jahre die nach dem Thomasverfahren erschmolzenen Flusstähle den Großteil der Werkstoffe ausmachen, können ab den 1950er Jahren verstärkt Siemens-Martin- oder Elektrostähle als heutige Altstähle vorgefunden werden. Bei letzteren hängt der metallurgische Zustand und damit die allgemeine Beanspruchbarkeit stark von der Art der Vergießung (dem Beruhigungszustand bzw. Desoxidationsgrad) ab. Unabhängig davon bleibt die Tatsache, dass die Werkstoffe natürlichen Alterungsvorgängen ausgesetzt sind, die ihre Eigenschaften stark beeinflussen und damit ihre heutige Nutzung im bauaufsichtlichen Bereich in Frage stellen. Altstahluntersuchungen sind aktuell keine Seltenheit mehr und erfordern ein besonderes Interesse bei Anwendern und Bauwerksprüfern, da diese sich oft deutlich von modernen Stählen unterscheiden bzw. ihre Vergleichbarkeit durch Untersuchungen eruiert werden muss. Der aktuelle Bundesverkehrswegeplan sieht bis zum Jahr 2030 vor, etwa 69 % der öffentlichen Aufwendungen für Instandhaltung und Reparatur bestehender Altsubstanz auszugeben [10]. Gleichzeitig ist festzustellen, dass ca. 50 % aller bestehenden stählernen Verkehrstragwerke vor 1950 erbaut wurden. Daraus ergibt sich eine problematische Situation für die Infrastruktur, da bis zum Abschluss der vorgesehenen Maßnahmen nicht alle Verkehrswege durch Neubauten ersetzt werden können. Zusätzlich kommen hohe finanzielle Aufwendungen eines umfangreichen Neubauprogramms dazu und bekräftigen dadurch die Forderung, Maßnahmen in den Erhalt bestehender Substanz zu stecken. Regelmäßig wiederkehrende Altstahluntersuchungen in der Werkstoff- und Bauteilprüfung sind eine Referenz an dieses aktuelle Thema.

Altstähle und ihre Eigenschaften

Als Alterung wird im Allgemeinen die Stoffeigenschaftsänderung eines Werkstoffes aufgrund von Diffusionsvorgängen bezeichnet. Je mehr Begleitelemente in einem Stoffsystem vorkommen, desto höher wird ihre Aktivität sein, durch das Atomgitter zu diffundieren. Dies tritt insbesondere bei interstitiell gelösten Elementen auf, die gut im Raumgitter diffusibel sind und erst bei höherer Konzentration zu Ausscheidungen führen. Dies trifft für Altstahl zu. Rein formal zählt dieser Werkstoff zu den unlegierten Baustählen nach DIN EN ISO 10 020. Bei Betrachtung der chemischen Analyse eines historischen Thomas-Stahls¹ fällt jedoch auf, dass sowohl die Anzahl als auch die Menge der atomaren Bestandteile gegenüber den aktuellen Stahlsorten erheblich größer ist (siehe *Tab. 1*). Aufgrund dieser Tatsache weist auch das Gefüge derartiger Stähle einige Besonderheiten auf, die von aktuellen Stahlwerkstoffen nicht mehr bekannt sind. *Abbildung 1* zeigt einige der typischen Charakteristika im Makrogefüge des zitierten Thomas-Stahls. Für diese Erscheinungen spielen die chemische Zusammensetzung, das Herstellungsverfahren, das Alter (und damit der Grad der Alterung) sowie die Belastungshistorie eine Rolle.

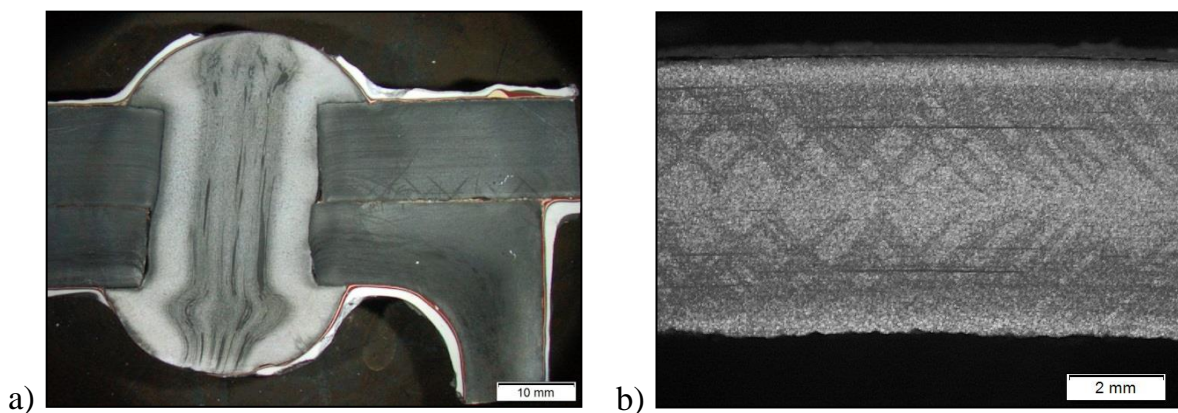


Abb. 1: Typische Makrometallographische Erscheinungen an Altstählen: a) Makroschliff durch eine Nietverbindung, b) FRY'sche Kraftwirkungsfiguren an einem Flachstahl

Fast alle der bis in die 1960er Jahre hergestellten Stähle wurden unberuhigt, d. h. ohne Desoxidation der Schmelze, vergossen. Die daraus resultierende metallurgische Erscheinung sind Seigerungen, welche erheblichen Einfluss auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften sowie auf die Schweißignung haben. Während der Randbereich frei von schädigenden Elementen ist (sogenannte Speckschicht), sammeln sich die ges-

¹ nach dem Thomas-Verfahren (ca. 1863-1955) hergestellter Fluss(=Konverter)-Stahl

eigerten Begleitelemente, vor allem Phosphor und Schwefel in der Blechmitte. Anisotropie und eingeschränkte Schweißbeignung sind die Folge. Aus Untersuchungen ist bekannt, dass sich auch die Festigkeitseigenschaften in Rand- und Kernbereich unterscheiden. Soll z. B. bei in situ durchzuführenden Arbeiten durch eine mobile Härteprüfung die Zugfestigkeit eruiert werden, muss davon ausgegangen werden, dass der ermittelte Wert nur für den sauberen Randbereich des Bleches gilt. Für aussagekräftige Ergebnisse müssen Proben entnommen werden, die mindestens den halben Querschnitt des Bleches in Dickenrichtung abdecken (z. B. durch Bohrkerne).

Tab. 1: Typische chemische Analyse eines Thomas-Stahls Anfang der 1950er Jahre

% C	% Si	% Mn	% Al	% P	% S	% N
0,02	0,01	0,1	0,001	0,15	0,7	0,018

Eine weitere wichtige Gefügeerscheinung mit erheblichen Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften stellen die herstellungsbedingt vorhandenen Ausscheidungen von Mangansulfid dar. Der hohe Gehalt an Schwefel ist auf die verbleibenden Verunreinigung der Schmelze während der Herstellung zurückzuführen und ist als solcher den historischen technologischen Bedingungen geschuldet. Mangan wurde (und wird) als festigkeitssteigerndes Element beigemischt und bindet gleichzeitig den Schwefel ab, indem es sich zu Mangansulfid verbindet. Dieses scheidet sich primär globular aus und wird durch den Walzprozess in längliche, zeilig angeordnete Formen gebracht. Die feste chemische Verbindung MnS wirkt störend auf den Gefügezusammenhalt und mindert insbesondere die Belastbarkeit des Werkstoffes in Dickenrichtung (Terrassenbruchgefahr). Diese Erscheinung gilt als lange bekannt und wird durch entsprechende Empfehlungen für Anwender, z. B. durch das WTA-Merkblatt E-7-3-05/D [11], berücksichtigt.

Herstellungsbedingt gelangt beim Erschmelzen Stickstoff aus der Umgebungsluft in das Atomgitter. Dieser bleibt zunächst interstitiell enthalten und kann bei Raumtemperatur nicht im Eisenmischkristall gelöst werden. Demzufolge kommt es zu Diffusion von Stickstoffatomen durch das kubisch-raumzentrierte Atomgitter im Eisen. Werden die Stickstoffatome durch blockierte Versetzungen in verfestigten Bereichen an der Diffusion gehindert, kommt es zur chemischen Verbindung mit Eisenatomen zu Eisennitrid. Es liegt feinnadelig innerhalb der Kristallitflächen vor (siehe Abb. 2). Zu beobachten ist, dass die Nitridnadeln stets in Nähe der Versetzungen im Kristallgitter, d. h. an Orten der Diffusionsbehinderung, vorliegen. Dies konnte in einem speziellen mikrometallographischen Nachweis in Anlehnung an das Ätzverfahren nach Köster

nachgewiesen werden. Bei Beanspruchungen unterhalb der Streckgrenze und auf lange Standzeiten bezogen, kann hier von natürlicher Alterung gesprochen werden, da das Eisennitrid die alterungstypischen Versprödungen maßgeblich verursacht. Bei Beanspruchungen oberhalb der Streckgrenze oder bei thermischer Aktivierung (künstliches Altern) ist dieser Effekt ebenfalls feststellbar. Der makrometallographische Nachweis sind die sogenannten Kraftwirkungsfiguren, welche erstmals durch FRY sichtbar gemacht wurden. Im Bereich der Ansammlung von Eisennitriden an Versetzungsgrenzen senkrecht zur Hauptspannungsrichtung im Bauteil erscheinen diese im Makroschliff als abgegrenzter, meist dunkler Bereich (siehe *Abb. 1*).

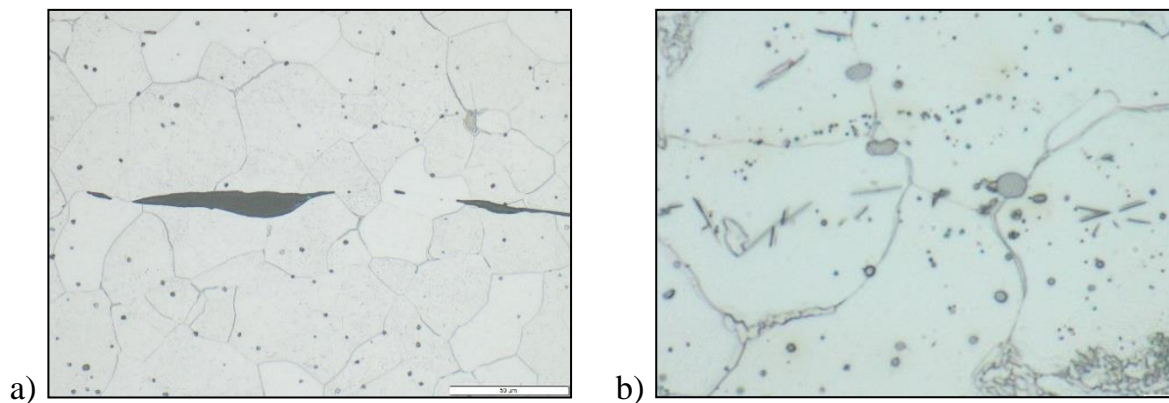


Abb. 2: Typische Mikrometallographische Erscheinungen an Altstählen: a) Mangansulfidausscheidungen in einem ferritischen Altstahl, b) nadelförmige Eisennitridsegregate in einem ferritisch-perlitischen Altstahl

Der beschriebene Effekt der Alterung, welcher durch Diffusion von Stickstoff und langfristiges Ausscheiden von Nitriden begründet ist, bildet die Grundlage für Überlegungen der Reversibilität dieser Alterung durch thermische Behandlungsmaßnahmen. So war und ist es aktuell Gegenstand von Forschungsaktivitäten, ein gezieltes Wärmebehandlungsverfahren zu finden, welches die Alterungsvorgänge rückgängig macht und dadurch den Werkstoff ertüchtigt.

Ermüdungsuntersuchungen an Altstählen unter Berücksichtigung ihrer eingeschränkten Schweißbeignung

Zur Verifizierung der untersuchten Altstahlwerkstoffe bzw. ihrer stofflichen Eigenschaften unter Wärmeeinwirkung wurden Ermüdungsuntersuchungen angestellt, welche die Festigkeit dieser Werkstoffe unter zyklisch-schwingender Belastung charakterisieren sollte. In Referenz an den Einsatzzweck dieser Stähle im bauaufsichtlichen Bereich wurden zum Vergleich moderne Werkstoffe geprüft. Referenzkriterium bildeten dabei standardisierte Wöhlerkurven in Anlehnung an das europäische Regelwerk DIN EN

1993-1-9 [12]. Darin wird u. a. festgeschrieben, welche Mindestschwingbreite unter Berücksichtigung werkstoffspezifischer Prüfparameter für verschiedene Kerbfälle nötig wird, um eine ausreichende Schwingspielzahl ertragen zu können, der sogenannten „Dauerfestigkeit“. Je nach Kerbdetail (Ausführung der Schweißgeometrie) werden so unterschiedliche Schwingbreiten verlangt. Dies wird notwendig, um eine Klassifizierung der Nahtarten vorzunehmen. Aufgrund der Kerbempfindlichkeit geschweißter Bauteile unter Betriebslasten, welche als wesentlich höher angesehen wird als diejenige durch die metallurgische Beschaffenheit [13], müssen die unterschiedlichen Stoßarten und Nahtformen differenziert betrachtet werden. Da der Begriff der Dauerfestigkeit nur von theoretischer Natur ist und auch im niedrigsten Lastniveau eine endliche Anzahl an Lastspielen bis zum Bruch erreicht wird [13], wird die Einführung von definierten Schwingspielzahlen in Standard-Wöhlerlinien notwendig, um eine Rechengrundlage zu ermöglichen.

Nach Beurteilung der bislang vorliegenden Ergebnisse für Dauerschwingversuche lässt sich feststellen, dass eine nominell geforderte Schwingfestigkeit gegeben ist. Wie im aktuellen europäischen Regelwerk angegeben, führt dieser Festigkeitswert zu einer Grenzschningspielzahl, welche als Quasi-Dauerfestigkeit angesehen wird, da der Wert N als in der Praxis annehmbare Anzahl an ertragbaren Lastspielen gilt. Dieser gilt jedoch nur für konstante Amplituden und bei Prüfung unter Laborbedingungen an definiert gekerbten Proben. Für unterschiedlich definierte Kerben werden demzufolge auch entsprechende Grenz-Schwingfestigkeiten festgelegt, was letztlich zur Klassifizierung in die sogenannten Kerbfälle führt. Im Eurocode [12] werden sie als FAT-Klassen definiert und können für die ermüdungsfeste Auslegung von Konstruktionen im Stahlbau berücksichtigt werden. Experimentelle Untersuchungen ergaben bereits, dass es hinsichtlich dieser Ermüdungsfestigkeitswerte keinen Unterschied macht, ob die definiert gekerbte Probe aus Altstahl oder aktuellem Material besteht. Daraus folgt, dass der mikrostrukturelle Zustand (die sogenannte metallurgische Kerbe) keinen Einfluss auf die Quasi-Dauerfestigkeit hat. Ausgangspunkt für Ermüdungsrisse bildet die geometrische, durch die Bearbeitung hervorgerufene, makroskopische Kerbe. Es bleibt zu beachten, dass nicht allein der Zeitpunkt, sondern hauptsächlich die Art des Versagens für Altstähle relevant ist. Mit vorangeschrittener Alterung und nachgewiesener Versprödung ist eher mit einem verformungslosen Versagen zu rechnen, das weit unterhalb der Schwingfestigkeit erfolgt.

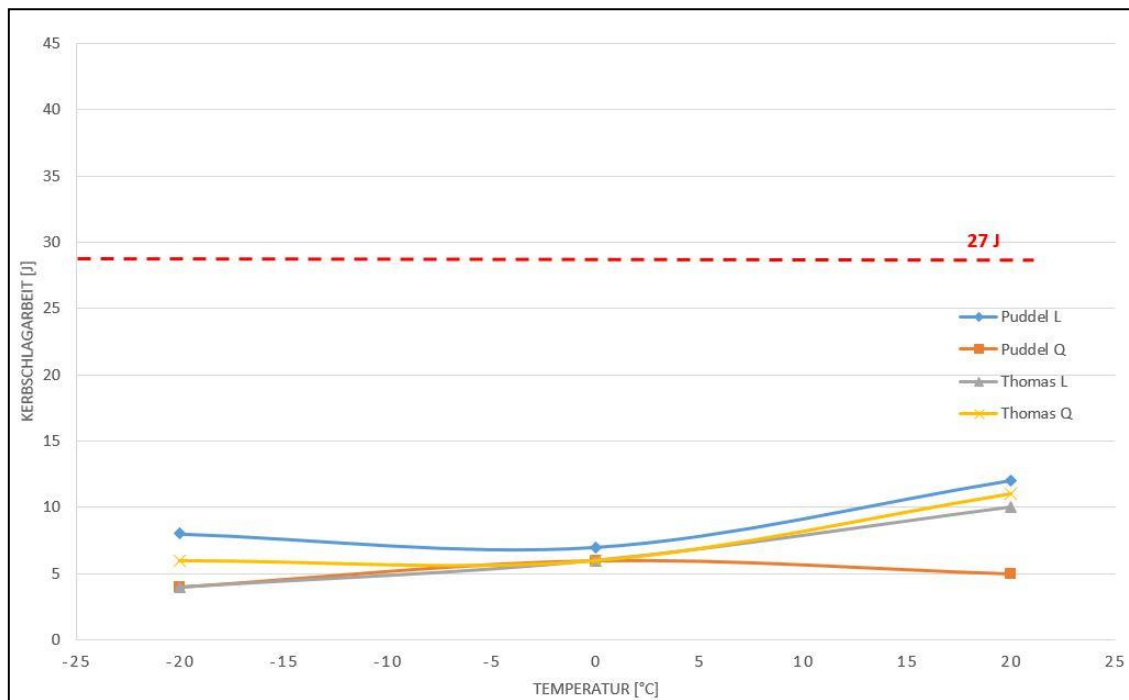


Abb. 3: Kerbschlagbiegeversuche an thermisch unbehandelten Altstählen (Puddel- und Thomasstahl). Nahezu vollständige Versprödung infolge Alterung

Abbildung 3 zeigt die Kerbschlagarbeitswerte ausgewählter Altstähle bei unterschiedlichen Prüftemperaturen im gealterten, nicht wärmebehandelten Zustand. Es ist deutlich zu sehen, dass der Verlauf der Kerbschlagarbeit als Zähigkeitskennwert nicht aus seiner Tieflage herauskommt. Dies deutet eindeutig auf eine hohe Versprödung hin. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass diese Werkstoffe hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften durchaus akzeptable Werte haben. So lassen Härte und Streckgrenze nicht auf eine Verschlechterung der Eigenschaften durch Alterung schließen. Durch die hochgradig vorangeschrittene Alterung mit einhergehender Versprödung sowie der Terrassenbruchgefahr aufgrund der mikrostrukturellen Unregelmäßigkeiten, wurde davon ausgegangen, dass auch die Schwingfestigkeit deutlich herabgesetzt war. Es wurden Dauerschwingversuche zur Charakterisierung der Kerbempfindlichkeit des Grundwerkstoffes durchgeführt. Die Ergebnisse davon sind Wöhlerlinien, welche dann mit den Angaben aus dem aktuellen Regelwerk für ermüdungsgerechte Bemessung (DIN EN 1993-1-9 [12]) verglichen werden konnten.

Wöhlerlinien werden seit der Etablierung der Fügeverfahren, an die Anforderungen hinsichtlich ihrer „Dauerhaltbarkeit“ gestellt werden, verwendet, um das Zeitstandsverhalten gekerbter Werkstoffe zu charakterisieren. Abbildung 4 zeigt Wöhlerlinien für den

damaligen Werkstoff St 37 SM² in verschiedenen Kerbfällen. So werden das Verhalten von ungekerbtem Grundwerkstoff, zum Nieten vorbereiteten gelochten sowie fertig genieteten Blechen in einem Diagramm gegenübergestellt. Deutlich erkennbar ist, dass mit gelochtem Material die Schwingfestigkeit herabgesetzt wird, da an den Nietlöchern Kerbwirkung entsteht und der Kraftfluss umgelenkt wird. Durch Spannungsüberhöhung aufgrund Lochleibung reduziert sich die Schwingfestigkeit nochmals an den fertig genieteten Proben. Daran wird sichtbar, dass zur Auslegung von gefügten Bauteilen im Stahlbau bereits vor Etablierung der Schweißtechnik Anforderungen an die „Dauerfestigkeit“ gestellt wurden. Im Zuge werkstofftechnischer Untersuchungen als Unterstützung rechnerischer Verfahren für Konstruktion und Bemessung ist es daher unerlässlich, Dauerschwingversuche durchzuführen, um durch Wöhlerlinien Erkenntnisse über die reine Schwingfestigkeit des Werkstoffes zu erlangen. Sie dient als Richtwert für das Tragverhalten der Konstruktion unter Betriebsbeanspruchungen, auch wenn für eine betriebsfeste Auslegung insbesondere von Maschinenteilen eine erweiterte Betrachtung der zyklisch ertragbaren Lasten erforderlich ist. In der Realität treten Belastungen jenseits konstanter Spannungskennwerte auf, sodass es Konzepte zur Abschätzung der echten Lebensdauer von Bauteilen gibt, die lediglich auf den Dauerschwingversuch zurückgreifen, ihn jedoch um Methoden zur Berücksichtigung von Schädigungen erweitern. Dennoch bleibt der Dauerschwingversuch ein notwendiges Mittel, Abschätzungen zur zyklischen Belastbarkeit von Werkstoffen als Kennwert zu ermitteln.

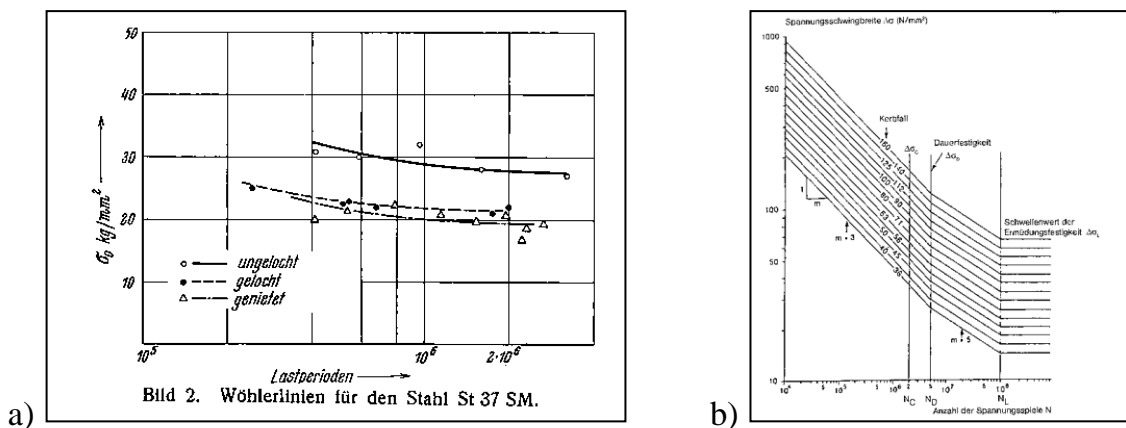


Abb. 4: Bewertung der Schwingfestigkeit von Baustählen anhand von Wöhlerlinien: a) Zeitgenössische Darstellung einer Wöhlerlinie zum Werkstoff St 37 (heute DIN EN 10 025-2 S235) aus dem Jahr 1936 [14], b) Aktuelle Darstellung standardisierter Wöhlerlinien für unterschiedliche Kerbfälle aus dem EC3 [12]

² im Siemens-Martin-Verfahren hergestellter Flussstahl mit einer Zugfestigkeit von $\approx 370 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 5 zeigt Wöhlerkurven eines im Ausgangszustand belassenen und in verschiedenen Kerbfällen geschweißten Altstahls. Wie zu sehen ist, werden die im EC3 geforderten Mindestschwingbreiten von 90 N/mm² bzw. 112 N/mm² (für einseitig geschweißte Stumpfnähte in eingeebner und nicht eingeebner Form) für $N = 2$ Mio. Schwingspiele übertroffen. Dadurch konnte der Nachweis geführt werden, dass geschweißte Altstahlproben zumindest hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit keine Verschlechterung aufzeigen, wenn sie schweißtechnisch bearbeitet werden.

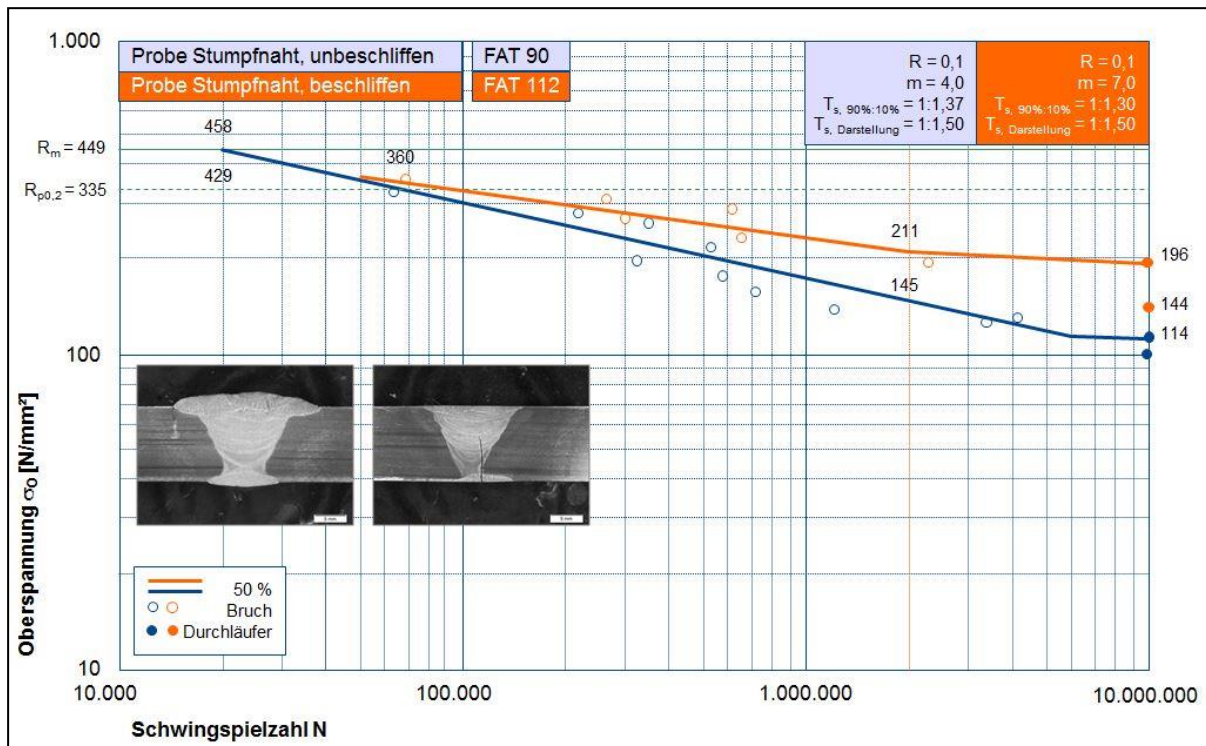


Abb. 5: Wöhlerlinien unterschiedlich gekerbter Altstähle (Thomasstahl T St52 aus den 1950er Jahren) im unbehandelten Zustand)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die bislang untersuchten Altstähle in allen betrachteten Kerbfällen gleichwertige Eigenschaften gegenüber dem Neumaterial zeigten. Dies bekräftigt die Hypothese, dass die Ermüdungsfestigkeit von Altstählen generell als unkritisch gelten kann und die Spröbruchneigung aufgrund der Alterungsmechanismen größeren Einfluss auf die Bewertung der Restlebensdauer hat. Entscheidend für die Ergebnisse der Dauerschwingversuche war die geometrische, d. h. die technologisch bedingte, und nicht die metallurgische, also die werkstoffbedingte, Kerbe. Dieses Erkenntnis bildete den Ansatz für die Suche nach gezielten Möglichkeiten, die Spröbruchneigung zu vermindern und den Werkstoff somit zu ertüchtigen.

Möglichkeiten der nachträglichen Ertüchtigung

In diesem Sinne liegt es nahe, eine Möglichkeit zu suchen, die Zähigkeitseigenschaften als letzten Baustein zur Restlebensdauer zu verbessern, um den Werkstoff zu ertüchtigen. Aufgrund der zurückliegenden metallographischen Untersuchungen konnten diffusionsbasierte Alterungsvorgänge, insbesondere von Stickstoff, dafür verantwortlich gemacht werden. Demzufolge zeigen sich thermische Eigenschaftsänderungen als geeignet. So wurde in Zusammenhang mit F. u. E.-Vorhaben nach Wärmebehandlungsverfahren gesucht, die es ermöglichen, die ausscheidungsbedingten Versprödungen reversibel zu machen und dadurch die Zähigkeit anzuheben [2].

Die Vorteile einer solchen Ertüchtigung sind offensichtlich: Zunächst kann das Risiko eines verformungslosen Versagens durch Spröbruch erheblich gemindert werden. Dies ermöglicht eine (längere) Restnutzung der Bauteile. Des Weiteren würde es möglich werden, die aktuell vom europäischen Regelwerk nicht erfassten historischen Baustähle (mit z. T. nicht mehr gebräuchlichen Bezeichnungen, wie z. B. St 52) als eigenständige „Gütegruppe Altstahl“ in die aktuelle Normung aufzunehmen. Durch Verbesserung der gewährleisteten Eigenschaften könnte somit beispielsweise aus einem unberuhigt vergossenen St 52 nach DIN 17100-1957 [15] ein DIN EN 10 025-1-S355 J0+RT³ [3, 16] werden. Durch diese nachträgliche „Anpassung der gewährleisteten Eigenschaften“ würde dem Werkstoff eine Weiterverwendung im bauaufsichtlichen Bereich ermöglicht werden. Die Kostenersparnis für Betreiber und Anwender ist erheblich. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass aufgrund von Qualitätssicherungsmaßnahmen, Verfahrensprüfung oder andere im bauaufsichtlichen Bereich üblichen Zertifizierungsprüfungen ohnehin Werkstoffuntersuchungen (zerstörender und zerstörungsfreier Art) vorgesehen sind. Die im Zuge einer thermischen Ertüchtigung notwendig werdenden Zusatzuntersuchungen übersteigen den Untersuchungsaufwand dazu nur unwesentlich.

Es ist bekannt, dass durch thermische Einwirkungen die Eigenschaften von Stahlwerkstoffen wesentlich verändert werden können. Dies erscheint insbesondere bei den Altstählen interessant, da hier bewusst Eigenschaftsänderungen erwünscht werden, wie sie nur durch Wärmebehandlungen erzielt werden können. In der Theorie sind diese bereits wesentlich eruiert und hinsichtlich ihrer Eignung auf Altstähle überprüft worden. Als geeignetes Verfahren hat sich hier besonders das Normalisierungsglügen herausgestellt.

³ „+RT“ = Raised Toughness (= Angehobene Zähigkeit). Ein durch nachträgliche Wärmebehandlung ertüchtigter Baustahl, in Anlehnung an DIN EN 10 027-1.

Diese Art von Wärmebehandlung wird insbesondere dann angewandt, wenn Grobkörnigkeit oder Zeiligkeit zu Anisotropie führt. Auf Altstähle angewendet führt dies zu erweiterten Möglichkeiten der Restnutzungsbewertung. Auch die gegenwärtige Situation hinsichtlich eines generellen Schweißverbotes an Altstahlkonstruktionen könnte dadurch erheblich verbessert werden. Einer Zustandsbeschreibung hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaftsveränderungen sollte sich die Entwicklung einer spezifischen Technologie für Altstahlbehandlungen in der Praxis anschließen. Aufgrund der komplexen Bauwerksgeometrie wird es unter Baustellenbedingungen schwierig sein, entsprechende Wärmebehandlungen durchzuführen, auch wenn diese sehr zielführend sind. Aus Glühversuchen unlegierter Baustähle ist bekannt, dass auch durch langes Glühen unter normalisierenden Bedingungen oft Anisotropie und Perlitzeiligkeit nicht vollständig beseitigt werden kann. Die Verbesserung der Zähigkeitseigenschaften kann daher nur in begrenztem Maße erfolgen. Als günstiger erweist sich ein Wärmebehandlungsverfahren, welches theoretisch das Lösungsverhalten für versprödet wirkende Elemente, wie z. B. Stickstoff, Phosphor und Schwefel, im Eisenmischkristall berücksichtigt. Diese Möglichkeit erscheint umso sinnvoller, wenn davon ausgegangen werden kann, dass die meisten Altstähle unberuhigt vergossen und daher ein nahezu vollständig ferritisches Grundgefüge aufweisen, welches unempfindlich gegen kritische Aufhärtungen ist. So konnte durch F. u. E.-Vorhaben ein Verfahren gefunden werden, welches aufgrund der im binären System Fe-N vorherrschenden Verhältnisse auf das Lösungsverhalten anspricht. Dabei wurden vergleichende Untersuchungen hinsichtlich der Zähigkeitseigenschaften (Kerbschlagbiegeversuche zur Ermittlung der Kerbschlagarbeit von verschiedenartig wärmebehandelten Altstahlproben) sowie metallographische Untersuchungen (Korngrößenbestimmung zur Eruierung der Gefügeveränderung derselben Proben) durchgeführt. Als besonders zielführend konnte dabei das sogenannte „Zähigkeitsglühen“ (+RT) herausgearbeitet werden.

Das Ziel der speziellen thermischen Behandlung sollte sein, die ungünstig verteilten Verunreinigungen von den Korngrenzen in das Korninnere zu bringen. Dieser Effekt ist mit der Umkörnung des Gefüges infolge der Austenitumwandlung und der damit einhergehenden Löslichkeit für die Verunreinigungselemente, wie z. B. Stickstoff, zu erklären. Gemäß dem binären Zustandsschaubild Eisen-Stickstoff besitzt unter normalen atmosphärischen Bedingungen der α -Mischkristall des Eisens fast keine Löslichkeit für Stickstoff. Sie beträgt maximal 10^{-5} % bei Raumtemperatur. Erst ab 590 °C wird eine ausreichende Löslichkeit des Stickstoffs im Eisenmischkristall erreicht. Der Sättigungsbereich beträgt maximal 0,1 % N bei 590 °C. Unterhalb dieser charakteristischen Tem-

peratur kommt es zur Bildung verschiedener Stickstoffverbindungen mit anderen Elementen (Nitride). Dabei wird unterschieden in stabile Ausscheidungsformen ($\alpha'' - \gamma'$) sowie metastabile Formen (ϵ -Nitride). Das stabile γ' -Nitrid scheidet sich typischerweise in nadeliger Form aus und ist als Fe_4N das typische in Altstählen nachweisbare Eisen-nitrid [17]. In *Abb. 6* ist der Einfluss des Normalisierungsglühens auf das Gefüge der Proben zu sehen. Während die Verunreinigungen im Wesentlichen erhalten blieben, weist das normalisierte Gefüge eine Feinkörnigkeit auf. Die damit verbundene Vervielfältigung der Korngrenzen trägt im Allgemeinen zur Steigerung der Festigkeit sowie zur Erhöhung der Zähigkeitseigenschaften bei. *Abbildung 6* zeigt die Ergebnisse der Zähigkeitsglühung für die Probensätze. Dabei ist deutlich die Umkörnung des Grundgefüges zu sehen. Der Ferrit liegt in nahezu nadeliger bzw. nadelartiger Form vor, während die schädigenden Ausscheidungen der Verunreinigungselemente nunmehr im Korninneren anstelle an den Korngrenzen sitzen. Durch diese gezielte Strukturveränderung ist eine deutliche Erhöhung der Zähigkeit erzielt worden. Dabei konnte es aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehaltes wie erwartet nicht zur Martensit- oder Zwischenstufengefügebildung (Bainit) kommen. Das Gefüge bleibt nahezu rein ferritisch.

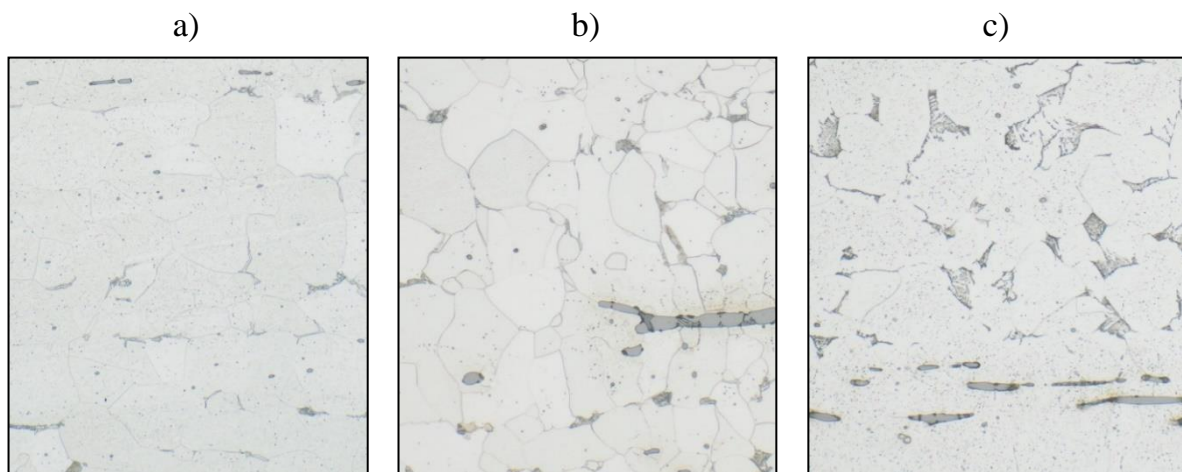


Abb. 6: Mikrogefüge von wärmebehandelten Altstahlproben: a) unbehandelter Zustand, b) normalisierter Zustand, c) zähigkeitsgeglühter Zustand

Durch die dargestellten Wärmebehandlungsmaßnahmen konnte die Kerbschlagarbeit teilweise um ein Vielfaches angehoben werden. *Abbildung 7* zeigt die aufgenommene Kerbschlagarbeit in Abhängigkeit zur Prüftemperatur. Deutlich ist zu sehen, wie die Zähigkeit des vollständig versprödeten Ausgangsmaterials aus seiner Tieflage angehoben wurde. Als geeignetes Verfahren erwiesen sich im vorliegenden Fall das Normalisierungsglühn sowie das sogenannte Zähigkeitsglühn, welches eine Weiterentwicklung des Normalglühens darstellt und nur für unberuhigt vergossene, d. h. kohlenstoffarme Massenzähle verwendet werden darf, um Martensitbildung zu vermeiden. Sowohl

in den Kerbschlagbiegeversuchen, als auch in den Ermüdungsversuchen stellte sich das Zähigkeitsglühen als besonders geeignetes Verfahren dar. Dies konnte durch die mikrophotographischen Aufnahmen zur Korngrößenbestimmung bestätigt werden, da durch das Zähigkeitsbehandeln die bedeutende Kornfeinung erzielt wurde. Aus metallurgischer Sicht wäre dieses Gefüge nunmehr zumindest bedingt schweißgeeignet, auch wenn nichtmetallische Einschlüsse und Mangansulfidzeilen trotz des Glühens weitestgehend erhalten geblieben sind. Es ist zu beachten, dass durch die erprobten Wärmebehandlungsverfahren nicht die Menge, sondern nur die Art des Vorkommens der Verunreinigungserscheinungen verändert wird.

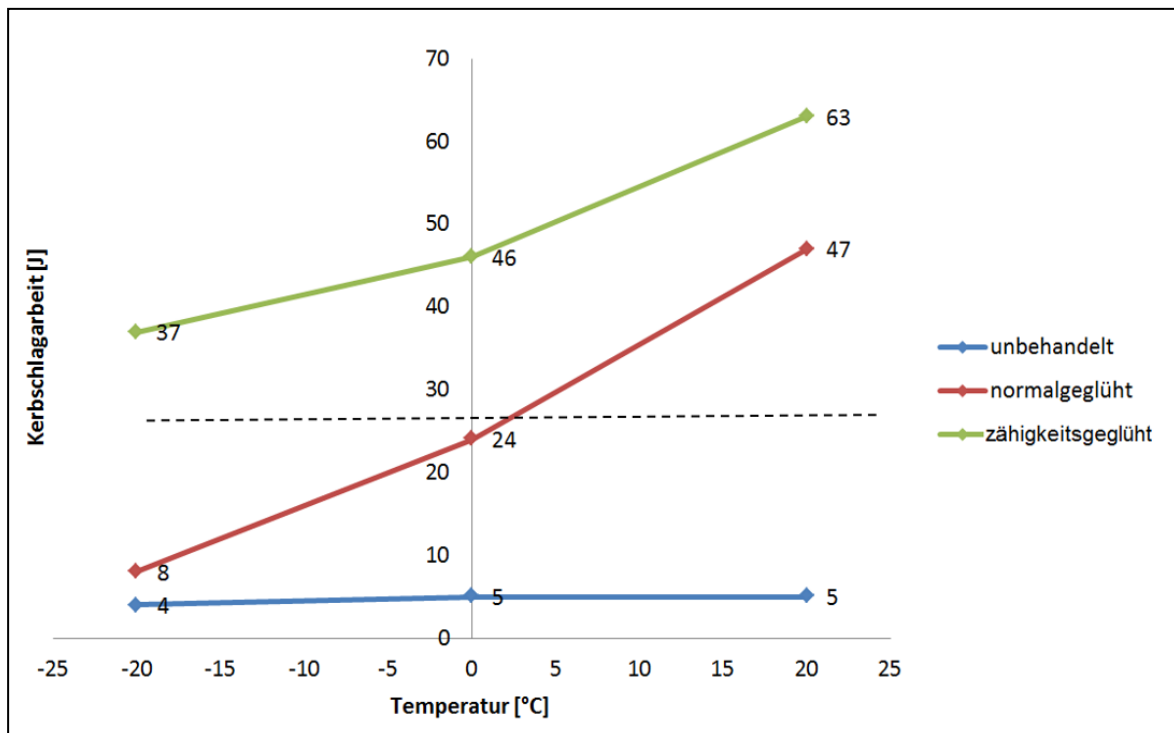


Abb. 7: Kerbschlagarbeit unterschiedlich gekerbter Altstähle (Thomasstahl T St52 aus den 1950er Jahren) im unbehandelten Zustand)

Tabelle 2 gibt die wesentlichen Eigenschaften und deren Veränderungen durch die Glühversuche, die in deutlicher Korrelation mit den Gefügebildern und den Kerbschlagarbeitskurven stehen, wieder.

Tab. 2: Gegenüberstellung der Ergebnisse verschiedener Wärmebehandlungen. Geltend für Thomasstahl, unberuhigt

<i>Werkstoffzustand</i>	<i>unbehandelt</i>	<i>normalisiert</i>	<i>zähigkeitsgeglüht</i>
<i>Festigkeit statisch</i>	<i>gegeben</i>	<i>unverändert</i>	<i>unverändert</i>
<i>Festigkeit zyklisch-schwingend</i>	<i>gegeben</i>	<i>unverändert</i>	<i>unverändert</i>
<i>Zähigkeit</i>	<i>nicht vorhanden</i>	<i>besser</i>	<i>erheblich besser</i>
<i>Metallurgie (Schweißbeignung)</i>	<i>nein</i>	<i>bedingt</i>	<i>bedingt</i>

Zusammenfassung

Viele Stahlbauwerke, darunter auch historisch wertvolle Konstruktionen, unterliegen aufgrund ihrer Materialeigenschaften dem Schicksal der Verschrottung. Grund dafür sind Stickstoffverbindungen im Stahl, die aufgrund des historischen Herstellungsverfahrens den Stahl im Alter verspröden lassen. Kommt es durch jahrzehntelange Nutzung zu Rissen, dürfen diese nach aktuellem Stand des Regelwerkes nicht durch Schweißen repariert werden. Die Folge sind hohe Kosten für Abriss, Herstellung und die Errichtung von Ersatzbauwerken. Mit dem hier dargestellten Ansatz würde es möglich werden, nachträglich derart gefährdete Stähle durch gezielte Wärmebehandlungsmaßnahmen wieder zu revitalisieren. Tausende Bauwerke könnten somit vor dem Abriss bewahrt werden und Kosten eingespart werden. Gegenwärtig ist es üblich, Altstahluntersuchungen vorzunehmen und bei Bestätigung des „schlechten“ metallurgischen Zustandes das Bauwerk entsprechend rückzubauen. Durch ein geeignetes Verfahren, dessen Verifizierung und weitere Erprobung durch zukünftige Forschungsvorhaben gesichert werden sollte, wird dieser Ansatz überwunden und somit die Möglichkeit einer seriösen Ertüchtigung in Erwägung gezogen.

Die bisherige kategorische Ablehnung schweißtechnischer Instandsetzungsmaßnahmen an Altstählen wird durch die Möglichkeit des nachträglichen Ertüchtigens in Frage gestellt. Die dabei entstehenden Kosteneinsparungen gegenüber der aktuellen Vorgehensweise sind beträchtlich. Durch den Abriss und die Entsorgung des Altmaterials sowie die Herstellung, Planung und Erbauung des Neuteils entstehen Kosten, die durch die

Anwendung des Zähigkeitsglühens entfallen. Die bisherigen in stationären Wärmebehandlungsöfen erarbeiteten Forschungsergebnisse zeigen eindeutig, dass auch trotz metallurgischer Unregelmäßigkeiten im Werkstoff eine Schweißbeignung möglich ist, wodurch die Restnutzungsdauerbewertung unterstützt wird. Mit der Möglichkeit des Einsatzes mobiler Wärmebehandlungsmethoden, z. B. induktiver Erwärmung, eröffnet sich die Möglichkeit der lokalen Ertüchtigung am Bauwerk. Hierfür liegen erste Untersuchungen vor.

Für Anwender und Betreiber von Altstahlkonstruktionen ist dieser Ansatz völlig neu. Der von den Autoren verfolgte Grundsatz lautet demzufolge: „Erhalt vor Neubau!“.

Literatur

- [1] Deutschen Bahn AG: Richtlinie „Tragsicherheit bestehender Eisenbahnbrücken“, Modulreihe 805, Ausgabe: 2002-09
- [2] Gajda, Ch.: Evaluierung von Ertüchtigungsmethoden reparaturgeschweißter und alterungsversprödeter Bauteile aus Altstählen durch gezielte Wärmebehandlungsmaßnahmen. Vortrag in Berlin zum Verbandstag des Verbandes Innovativer Unternehmen e. V. 01.12.2016. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016
- [3] DIN EN 10 025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen. Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle. Ausgabe: 2005-02
- [4] International Council on Monuments and Sites (ICOMOS): International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964). Venedig: 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, 1964
- [5] Lorenz, W.: Bausystem und Tragwerk Stahl. <http://denkmalpraxismoderne.de/bausystem-und-tragwerk-stahl/> BTU Cottbus: Onlineveröffentlichung, 2018
- [6] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bundesverkehrswegeplan 2030. Entwurf März 2016. Berlin: 2016-03
- [7] Geißler, K.: Bewertung bestehender Stahlbrücken. Berlin: Ernst u. Sohn, Stahlbaukalender, 2006
- [8] Gajda, Ch.: Influence of aging on the fatigue strength of historic steel structures from so-called old steels. Symposium on Structural Durability SoSDid 2017, Darmstadt, 18. Mai 2017

- [9] Lanz Forschungsdienst: Die Entwicklung des Gusseisens zum Lanz-Perlit. Mannheim: Heinrich Lanz AG, 1941
- [10] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bundesverkehrswegeplan 2030. Entwurf März 2016. Berlin: 2016-03
- [11] WTA Merkblatt E-7-3-05/D: Sanierung historischer Stahl- und Gusskonstruktionen nach WTA I – Schweißen von Altstahl. Ausgabe: 2005
- [12] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung. Ausgabe: 2010-12
- [13] Sonsino, C. M.: Ausgewählte Einflussgrößen auf die Betriebsfestigkeit. MP Materials Testing. München: Carl Hanser Verlag, Heft 52, 2010, 7-8, S.428 ff.
- [14] Klöppel, K.: Gemeinschaftsversuche zur Bestimmung der Schwellzugfestigkeit voller, gelochter und genieteter Stäbe aus St 37 und St 52. Der Stahlbau (Beilage zur Zeitschrift „Die Bautechnik“) Berlin: Heft 13/14, 1936, S.97 ff.
- [15] DIN 17 100: Allgemeine Baustähle – Gütevorschriften. Ausgabe: 1957-10
- [16] DIN EN 10 027-1:2005: Bezeichnungssystem für Stähle. Teil 1 – Kurznamen. Ausgabe: 2005
- [17] Schumann, H.: Metallographie. 8. Auflage. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974

Autorenanschriften

M.Eng. Christoph Gajda

Prof. Dr.-Ing. Jochen Schuster

Dipl. Ing. Steffen Wagner

Prof. Dr.-Ing. Steffen Keitel

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH

Köthener Straße 33a

06118 Halle (Saale)

Telefon: 0345-5246458

E-Mail: gajda@slv-halle.de

Die in diesem Aufsatz veröffentlichten Forschungsergebnisse waren Bestandteil einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsleistung unter dem Kennzeichen VF160024. Die Autoren danken der EuroNorm GmbH für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens, das als Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie erfolgte.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages